

ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КРИОПРОКАТАННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

Крымский С.В., Маркушев М.В., Автократова Е.В., Ситдилов О.Ш.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

e-mail: stkr_imspl@mail.ru

Исследования последних лет, посвященные разработке новых методов упрочнения металлических материалов, обусловили значительный интерес к деформированию в условиях низких (криогенных) температур. В результате такого воздействия на металлы и сплавы, в них формируется развитая дислокационная структура, а при больших пластических деформациях происходит наноструктурирование (НС). При этом механизмы формирования и особенности наноструктур во многом не ясны, не определен потенциал упрочнения материалов в результате их формирования, а также слабо изучено структурно-механическое поведение криодеформированных материалов при последующем термическом воздействии. Решение этих вопросов наиболее актуально для дисперсионно-твердеющих сплавов.

Материалом исследования служил промышленный горячепрессованный прутки \varnothing 60 мм сплава Д16 стандартного химического состава (Al-4,4Cu-1,4Mg-0,7Mn, вес. %) с грубоволокнистой структурой. Заготовки в виде пластин толщиной 5 мм, вырезанные вдоль оси прутка, перед деформацией нагревали до температуры 505 °С и закачивали в воду для фиксации пересыщенного алюминиевого твердого раствора. Далее сплав прокатывали в изотермических условиях при температуре жидкого азота на лабораторном четырехвалковом стане с суммарной степенью деформации $\epsilon \sim 2$ (86 %). После прокатки полосы подвергали постдеформационному отжигу в интервале температур от комнатной (длительностью до 6 суток) до 190 °С (до 48 часов).

Структуру и фазовый состав сплава анализировали методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии (ОМ и ПЭМ). Качественный и количественный анализ микроструктуры проводили с помощью микроскопа Nikon L-150 на механически полированных и протравленных реактивом Келлера шлифах. Тонкую структуру изучали в электронном микроскопе JEOL-2000EX на объектах, изготовленных струйной электрополировкой в 20% растворе азотной кислоты в метаноле. Микротвердость измеряли на приборе Axiovert при нагрузке 1 Н. Параметры прочности сплава при одноосном растяжении при комнатной температуре (условные пределы прочности и текучести ($\sigma_{0,2}$ и σ_b), а также относительное удлинение (δ), определяли на образцах с рабочей частью 9x3x0,7 мм. Характеристики трещиностойкости (удельную работу зарождения и роста трещины (A_z и A_p)) оценивали по методу Кана при

внецентренном растяжении плоских образцов с боковым V-образным концентратором.

Обнаружено, что криопрокатка качественно не изменила тип структуры матрицы сплава, которая осталась грубоволокнистой, заметно уменьшив лишь толщину волокон. Прокатка сопровождалась формированием деформационных макрополос и микрополос сдвига, а также замещением субструктуры пресс-эффекта на развитую наноячеистую (размер ячеек 100-200 нм) структуру (Рис. 1).

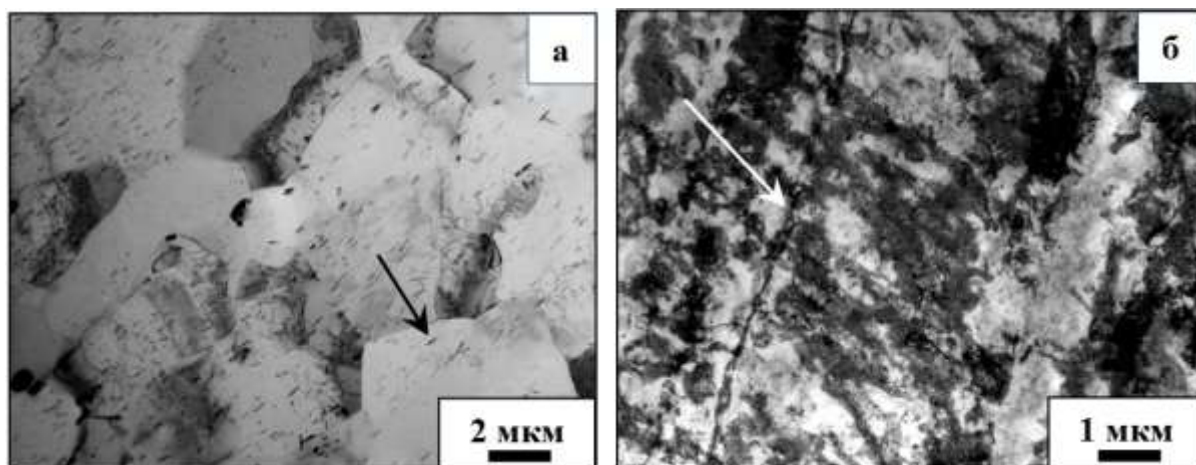


Рисунок 1. ПЭМ структура горячепрессованного (а) и криопрокатанном с $\epsilon \sim 2,0$ (б) сплава Д16 (белая стрелка указывает на “старую” границу волокна, черная – на частицу Т-фазы ($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$)).

Последующее вылеживание сплава в течение ~ 6 суток при комнатной температуре привело к зонному распаду предварительно пересыщенного алюминиевого раствора, протекавшего в развитой наноячеистой структуре, и фиксированию уникально высокой прочности сплава ($\sigma_{0,2} = 590$ МПа, $\sigma_B = 640$ МПа) при удовлетворительной пластичности ($\delta = 6$ %) и низкой трещиностойкости ($A_3 = 27$ кДж/м², $A_p = 4$ кДж/м²).

В процессе пост-деформационного отжига криопрокатанного сплава при более высоких температурах распад твердого раствора сопровождался возвратом и непрерывной рекристаллизацией матрицы. При этом структура преобразовывалась в более равновесную смешанную с наноразмерными упрочняющими частицами метастабильных и стабильных S (Al_2MgCu) и θ (Al_2Cu) фаз внутри и на границах дислокационных ячеек, субзерен и зерен. С увеличением температуры и времени искусственного старения структура матрицы все больше приобретала черты нанокристаллической, оставаясь, однако, бимодальной, преимущественно состоящей из областей со структурой возврата, упрочненных пластинчатыми выделениями шириной ~ 2 -10 нм и длиной до ~ 100 нм, и

областей рекристаллизованных зерен, содержащих компактные выделения диаметром от 10 до 50 нм меньшей плотности (Рис. 2).

В результате таких структурных изменений, имевших место, например, при старении прокатанного сплава по серийному режиму Т1 (при 190 °С, 12 ч), его прочность заметно уменьшилась ($\sigma_{0,2} = 405$ МПа, $\sigma_B = 465$ МПа), а показатели пластичности и трещиностойкости увеличились лишь незначительно ($\delta = 7\%$, $A_3 = 31$ кДж/м², $A_p = 9$ кДж/м²).

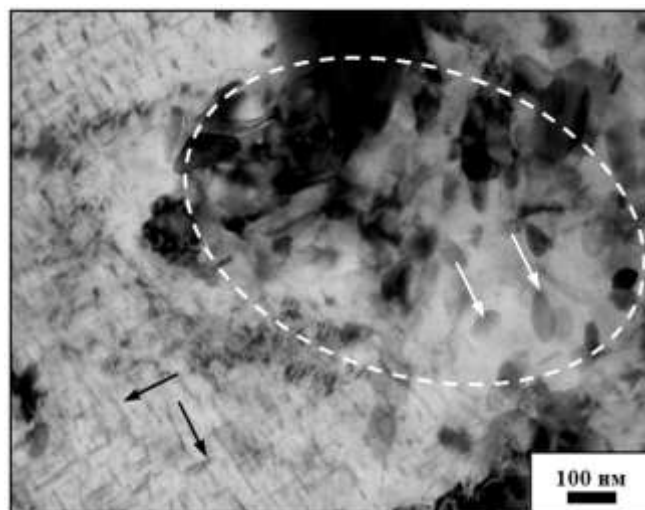


Рисунок 2. ПЭМ структура сплава Д16 после криопрокатки и пост-деформационного отжига при температуре 190 °С в течение 12 часов (овал указывает область рекристаллизованной наноструктуры, темные стрелки – пластинчатые выделения S-фазы, светлые стрелки - компактные частицы θ -фазы).

Отжиг же криопрокатанного сплава по разработанным режимам привел к его одновременному и упрочнению ($\sigma_{0,2} = 610$ МПа, $\sigma_B = 665$ МПа) и повышению параметров его пластичности ($\delta = 10,4\%$) и трещиностойкости ($A_3 = 42$ кДж/м², $A_p = 18$ кДж/м²), причем значительному, придав сплаву уникальный баланс механических свойств, определяющий его конструкционную прочность в условиях статического нагружения при комнатной температуре.

Обсуждены вопросы эффективности обработки алюминиевых сплавов типа Д16 с использованием криогенной прокатки, а также ее потенциала как промышленного технологического процесса получения высокопрочных листов для изделий новой техники.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (гос. контракт № 14.740.11.0278).